

рис.1. (а) МЭД изображение зерна ЛМО: (а)- топография зерна, (б) – карта распределения локального коэффициента диффузии в зерне, (в) – карта распределения локального коэффициента диффузии в зерне

Для количественного определения локальной концентрации ионов и коэффициентов диффузии использовалась зависимость электрохимического отклика от частоты. Анализ серии МЭД изображений, полученных при различной частоте возбуждающего напряжения, позволил построить карты распределения локальной концентрации ионов и коэффициентов диффузии ионов лития в отдельных зернах ЛМО (рис. 1). Полученные средние значения концентрации ионов в зерне: $7,1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, и коэффициент диффузии: $1,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$, соответствуют значениям, измеряемым макроскопическими методами [4]. Показано, что распределение концентрации ионов лития и диффузионных коэффициентов неоднородно по зерну: например, наблюдаются вытянутые, проходящие через все зерно, области, обедненные литием с коэффициентом диффузии близким к нулю, что, вероятно, всего связано с дефектной структурой материала. Интерпретация данных о неоднородном распределении электрохимических характеристик даёт принципиальную возможность изучения процессов деградации катода на уровне отдельных зёрен.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ.

Список публикаций:

- [1] J. Li, J.-F. Li, Q. Yu, Q.N. Chen, S. Xie // *J. Mater.* 1. 2015 C. 3–21.
- [2] K. Romanyuk, C.M. Costa, S.Y. Luchkin, A.L. Kholkin, S. Lanceros-Méndez // *Langmuir*. 2016. №32. C. 5267–5276.
- [3] D. Seol, S. Park, O. V. Varenyk, S. Lee, H.N. Lee, A.N. Morozovska, Y. Kim // *Sci. Rep.* 2016. №6 C. 30579.
- [4] R.E. Garcia, Y.-M. Chiang, W. Craig Carter, P. Limthongkul, C.M. Bishop // *J. Electrochem. Soc.* 2005. 152 A255.

Особенности проявления эффекта памяти формы и сверхэластичности в [011]-монокристаллах ферромагнитного сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при сжатии

Тохметова Аида Бауыржановна

Ларченкова Наталья Геннадьевна

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Панченко Елена Юрьевна, д.ф.-м.н. Чумляков Юрий Иванович, д.ф.-м.н.

Aida-tx@mail.ru

Монокристаллы ферромагнитного сплава $\text{NiFeGa}(\text{Co})$, испытывающие термоупругие L21-14M-L10 мартенситные превращения (МП), представляют большой практический интерес как многофункциональные материалы. Наряду с механическим эффектом памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичностью (СЭ) эти кристаллы могут испытывать магнитный ЭПФ – большие обратимые деформации до 8.5 % под действием магнитного поля за счет переориентации мартенситных вариантов [1]. Известно, что монокристаллы сплавов $\text{NiFeGa}(\text{Co})$ обладают сильной ориентационной зависимостью и асимметрией функциональных свойств – ЭПФ и СЭ [2, 3]. Поэтому для создания материалов на основе сплавов $\text{NiFeGa}(\text{Co})$, обладающих оптимальным комплексом свойств, обладающих обычным и магнитным ЭПФ, необходимы систематические исследования закономерностей развития термоупругих МП при охлаждении/нагреве и под нагрузкой, механических характеристик материала в зависимости от ориентации кристалла и способа деформации.

В настоящей работе проведено исследование особенностей развития мартенситного превращения (МП) в [011]-монокристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при проявлении ЭПФ (изобарические испытания в циклах при охлаждении/нагреве под действием постоянной нагрузки) и СЭ (изотермические испытания в циклах нагрузка/разгрузка при постоянной температуре $T = 293 \text{ К}$). Результаты исследований представлены на рис. 1а, б. Исследование ЭПФ при изобарических испытаниях показало, что при охлаждении/нагреве под действием сжимающей нагрузки менее 10 МПа образуется самоаккомодирующая структура мартенсита и макроскопической деформации образца не происходит (рис. 1а). При дальнейшем увеличении напряжений с 10

до 60 МПа наблюдается ЭПФ с величиной обратимой деформации от 1,3 до 5,3 %. Термический гистерезис, характеризующий рассеяние энергии при развитии МП в циклах нагрев/охлаждение, увеличивает в 4 раза, а температурные интервалы развития прямого и обратного превращения, наоборот, сокращаются с ростом внешних приложенных напряжений. При внешних напряжениях 60 МПа прямое и обратное МП имеет взрывной характер – деформация образца происходит в очень узком интервале температур 1-2 К, практически мгновенно (рис. 1а).

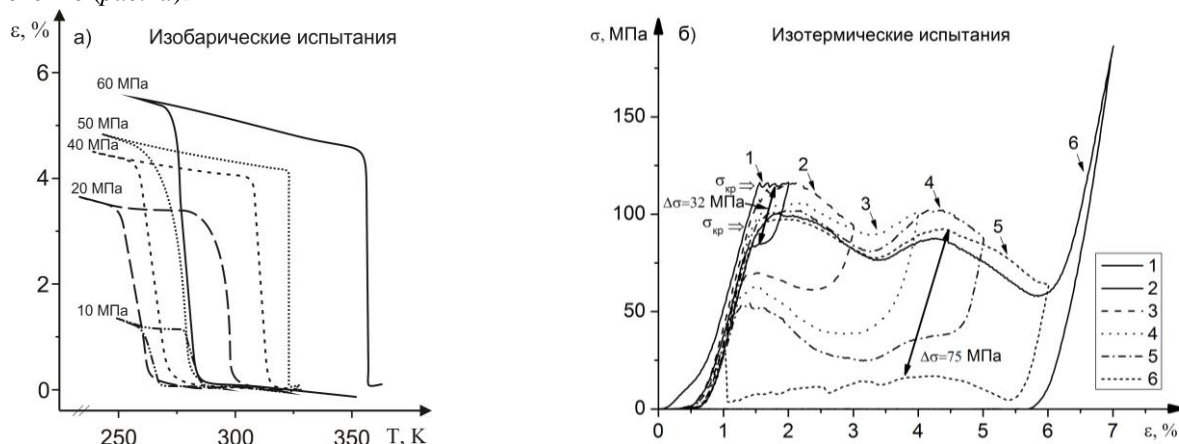


рис.1. Зависимости а) «деформация – температура» (изобарические испытания) и б) «напряжение-деформация» (изотермические испытания) для [011]-монокристаллов сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при действии сжимающих напряжений

При развитии МП под нагрузкой при постоянной температуре кривые «напряжения-деформация» демонстрируют нестабильное течение – наблюдается две стадии уменьшения и увеличения напряжения с ростом деформации. При этом механический гистерезис, характеризующий рассеяние энергии при развитии обратимых МП, увеличивается от 32 до 75 МПа с ростом заданной деформации от 1.5 до 6.0 %. При достижении заданной деформации более 6 % наблюдается полная стабилизация L10-мартенсита. Для того, чтобы произошло обратное МП после снятия нагрузки необходим дополнительный нагрев на 20-30 К. Обратное превращение носит взрывной характер и приводит весь образец в движение. Такой эффект стабилизации мартенсита наблюдали ранее в [011]-кристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при деформации сжатием в работе [4]. Однако данный эффект отсутствует при деформации [001]-образцов $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$, в которых величина механического гистерезиса не превышает 30 МПа и не зависит от степени деформации [5].

Согласно теоретическим расчётам показано, что в [011]-монокристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при сжатии до 6 % большой вклад в деформацию превращения вносит раздвойникование кристаллов мартенсита ($\varepsilon_{\text{detw}} = 3.06\%$). В отличие от [001]-кристаллов, для которых $\varepsilon_{\text{detw}} = 0\%$ по геометрическим условиям нагружения [6]. Таким образом, показано, что раздвойникование кристаллов L10-мартенсита под нагрузкой в условиях изотермических и изобарических испытаний в [011]-монокристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при сжатии приводит к стабилизации L10-мартенсита, резкому росту термического и механического гистерезиса с ростом величины ЭПФ и СЭ и взрывному характеру МП.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 16-19-10250

Список публикаций:

- [1] Morito, H., Fujita, A., Oikawa, K., and et.al // *Applied Physics Letters*. 90(6), 062505 (2007).
- [2] Тимофеева Е.Е., Панченко Е.Ю., Ветошкина Н.Г. и др. // *Известия высших учебных заведений. Физика* 2016. Т. 59. № 8. С.114-122.
- [3] Николаев В.И., Якушев П.Н., Малыгин Г.А. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. Вып. 19. С. 83-90.
- [4] Николаев В.И., Якушев П.Н., Малыгин Г.А. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42. Вып. 8. С. 83-90.
- [5] Timofeeva, E.E., Panchenko, E., Chumlyakov, Y., Vetoshkina, N.G., Maier, H.J. // *Materials Science and Engineering A* 640 (2015) 465-470.
- [6] Panchenko E., Chumlyakov Y., Maier H.J., Timofeeva E., Karaman I. // *Intermetallics* 18(12) (2010) 2458-2463.